

超伝導磁気浮上走行体の速度測定

高重正明¹ 勝呂吏湖² 橋本明美³ 山口俊久¹

The Velocity Measurement of the Superconductive Magnetic-Levitated Vehicle

Masaaki TAKASHIGE¹, Riko SUGURO², Akemi HASHIMOTO³
and Toshihisa YAMAGUCHI¹

By Meissner effect and the magnetic flux pinning effect, superconductor can levitate and run on a magnetic rail. In this study, an experiment to measure the velocity of the superconductive body was performed, which runs without contact on the rail consisting of an array of neodymium or ferrite magnets. On such magnetic rails having several different gradients, the sliding velocity of the superconductive body was measured. From results, the relation between the friction and the velocity of superconductor were discussed. The brief summary of physics for superconductivity, in particular for magnetic properties, was also given.

キーワード：超伝導, 磁気浮上, マイスナー効果, 磁束のピン止め

Keywords : superconductivity, magnetic levitation, Meissner effect, flux pinning

1. はじめに

超伝導体のマイスナー効果や磁束のピン止め効果と呼ばれる現象を利用すると、磁場中で超伝導体に特別な運動をさせることが可能である。ある方向に磁場分布が均一になるように永久磁石を配置して軌道を作り、その上に冷却して超伝導状態にした物体を載せると宙に浮かぶ。それに力を加えると、一見、何の摩擦も無いように運動が起こる。これは多くの人達にとって、非常に不思議な印象を与えるので、超伝導という現象の存在に興味を持ってもらうという上では、大変効果的なものである。

そのため、液体窒素 (77 K) で冷やすことで超伝導になる酸化物超伝導体が発見されて以後、科学教育などの行事などでも、超伝導体と磁石を使った展示実験 (デモンストレーション) が行われるようになった。筆者の一人 (高重) も 1990 年台初めから¹⁾、いわき明星大学でそのような試みを積極的に行ってきた。本学赴任後も、毎年 7 月末に行われている夏休み科学体験教室で同様な試みを取り入れているので、もう 25 年以上、超伝導体と磁石を使ったデモンストレーションに関わっていることになる。

この間、数多くの種類の展示用実験装置を製作してきたが、そのすべてに共通なことは、上述したような永久磁石軌道上で、冷却した超伝導体が、ほとんど摩擦が無いように走行するということである。また、ピン止め効果を利用すると磁石

軌道下に超伝導体を吊下げて (懸垂) 走行させることも可能であるので、筆者らは、このような装置のことを超伝導磁気浮上懸垂走行装置と呼んでいる。走行体を自動的に加速する機構や軌道の分岐装置²⁾なども開発しており、かなり以前から公表している。

ところで、超伝導体が磁石軌道上でほとんど抵抗 (摩擦) 無く走行すると述べてきたが、走行時の抵抗力が全く 0 というわけではない。空気抵抗は別として、磁気軌道上を超伝導体が動くときに、磁束の乱れがあると抵抗力が発生することが知られており³⁾、これは実用上も重要な問題である。時折、デモンストレーションの聴衆からも、どの程度の抵抗力があるのか質問を受けることがある。しかし磁場中で走行している超伝導体にどの程度の抵抗力が働いているかを、定量的に調べた実験は少ないように思う。

そこで、筆者らは上述したような展示実験に使用しているものと同じスケールの磁気軌道上で超伝導体を走行させて、その速度を測定して走行時に発生している抵抗力を求めるといった実験を行った。本稿はその結果を報告することが目的であるが、まず超伝導の基本事項を簡単に説明し、次に上記のような超伝導磁気浮上懸垂走行装置の概要を紹介する。そして、実験結果と議論を行うことにする。

なお、超伝導体では抵抗という用語は電気抵抗を意味することがほとんどであるので、混乱を避けるために、ここでは走行時の力学的抵抗のことを「抵抗力」と、あえて「力」を

1 明星大学 理工学部 総合理工学科 物理学系 教授 物性物理学

2 明星大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 物理学専攻

3 明星大学 理工学部 研究生

つけて呼ぶことにしている。

2. 超伝導の基本事項

2-1 超伝導と磁氣的性質

超伝導とは物質を冷却すると、ある温度（超伝導臨界温度と呼び T_c で表わす）以下で、電気抵抗が突然 0 になることで発見された相転移現象である。 T_c より上の状態を常伝導状態といい、これは特別な状態ではない。電気抵抗が 0 になる性質は完全導電性①と呼び、これは応用上、最も重要な現象であり、工学分野では「超電導」と表記することが普通である。しかし超伝導に関わる現象はこれに限らず、マイスナー効果②、磁束の量子化③、そしてジョセフソン効果④と呼ばれるものがあり、物性物理学分野の中核をなす研究対象となっている。

本研究は超伝導体のもつ磁氣的な性質を応用するものである。本節では上記、①～④の4つの性質の中で、特にマイスナー効果とそれに関連した磁氣的な性質についてのみ、簡単に説明しておく。

マイスナー効果とは、磁場を印加しながら超伝導体を T_c 以下へ冷却すると、内部の磁場が外へと押し出される現象である。これは超伝導体内部に外部磁場を完全に打ち消すような逆向きの磁化が発生したとも考えられるので、完全反磁性ともいう。図 1 (a) と (b) は円盤状の超伝導体から磁束が排除される様子を模式的に描いたものである。(a)では4本の曲線で描いた磁束が、(b)では6本が超伝導体から排除されている。これがマイスナー効果であり、超伝導体は排除された磁束から圧力を受けるので、磁場分布を工夫すれば、超伝導体を宙で浮かべることが可能になる。

しかし、さらに磁場を強くしていくと、ある磁場以上では磁束は超伝導体を貫いてしまい超伝導性は壊れてしまう。図 1 (c) はそれを表している。このようにある値以上の磁場（臨界磁場と呼び H_c で表す）で超伝導性が突然壊れてしまう超伝導体のことを第 I 種超伝導体と呼ぶ。なお H_c の大きさは、0.05～0.06 T（テスラ）程度である。

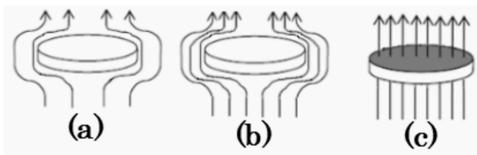


図 1 マイスナー効果（第 I 種超伝導体）

一方、それらに対し、超伝導体には第 II 種超伝導体というものもある。これは、弱い磁場の場合は第 I 種超伝導体と同じく磁束を完全に排除するが、ある値以上の磁場 (H_{c1} で表す) では、一部の磁束が超伝導体の中に侵入し始めて、超伝導と常伝導の部分が混在した状態になるもので、図 2 (b) と (c) はその混合状態を表したものである。さらに磁場を強くして、ある値以上の磁場 (H_{c2} で表す) になると超伝導状態は壊れてしまう。 H_{c1} は第 I 種超伝導体の H_c よりやや小さいか同程度、

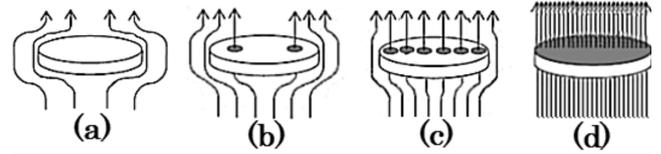


図 2 磁束の侵入（第 II 種超伝導体）

H_{c2} は非常に大きく数 10 T 以上である。

混合状態では、侵入している磁束は超伝導体内を動く可能性があるが、人為的に絶縁体不純物を試料中に分散しておき（ピン止め中心という）、そこへ磁束を固定すること（ピン止め効果という）ができる。磁束がピン止めされると超伝導体を磁場の中に拘束することができる。なお、ここでは詳述しないが、混合状態で超伝導電流が流れているときに侵入磁束が動くとき電気抵抗が発生するので、大電流を流す実用材料を開発する上では、ピン止めを強くすることは極めて重要である。

以上のようなマイスナー効果やピン止め効果を利用すると、超伝導体を磁束により宙で支えることができるので、上述したような超伝導磁気浮上懸垂走行装置を作ることができる。その詳細を理解するためには磁気軌道の説明が必要である。このため、次節ではそれについて述べる。

2-2 超伝導体と磁気浮上

超伝導体を磁石の上で、ある方向に安定に動かすような実験を行う場合には、磁場分布に工夫が必要である。筆者らの場合は図 3 のように、上面が N, S, N 極とした 3 組の小さい永久磁石（10 mm × 20 mm × 3 mm 程度の大きさ）を横に配列したものを使っている。この配列では長手方向には、磁石同士の反発があるので、そのままでは安定な配置が困難であるが、透磁率の高い珪素鋼のような板上に配列すると、そのような配置が可能になる。これは磁石の端面にでてる磁束が鋼板に吸い込まれるためである。

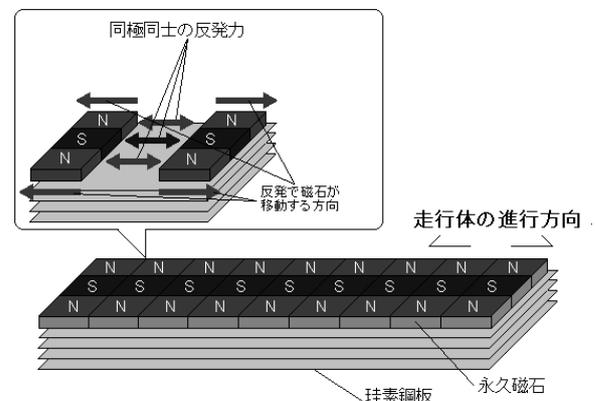


図 3 磁気軌道の磁石配列

このような配列をすることで、矢印の方向にほぼ均一の磁場分布が実現されるが、問題は軌道に垂直な断面の磁場分布

である。図 4 (a) はそれを模式的に描いたものである。以下では磁石に記した N, S は上面の極を表わす。なお、両側の N 極の軌道外側への磁束は省略してあることに注意されたい。実際には磁束は左右に 2 つの山を作るように分布している。

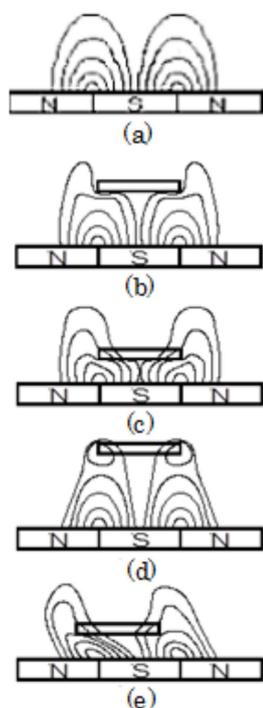


図 4 磁石軌道上で超伝導体にはたらく力

このような磁石軌道上に、すでに T_c 以下に冷却した第 II 種超伝導体を置いたときのことを考えてみる。超伝導体を上から近づけていくと、まずマイスナー効果による磁束の排除が起こる。これは図 4 (b) のような状態と考えられる。超伝導体は両側から対称的に磁束に支えられているので、軌道上に安定に浮上する。

次に、図 4 (b) よりもさらに磁石表面に超伝導体を押し付けると、図 4 (c) のように磁束の一部が内部に侵入する。ピン止め効果が効いている場合はある程度、磁束が侵入するとそのパターンは保持され、それ以上の磁束は侵入できない。もっと超伝導体と押し付けると、超伝導体下部の磁束はそれ以上内部には侵入できないために、超伝導体と軌道との間には反発力が発生する。

また、一旦磁束を侵入させた後、図 4 (d) のように、超伝導体を軌道から離すと、引力がはたらか、横にずらすと図 4 (e) のように中央に戻そうとする復元力がはたらくことになる。特に図 4 (d) で上下を逆にすると、超伝導体が軽い場合は、軌道下に懸垂することが可能になる。

このようにして、超伝導体は磁気軌道上にマイスナー効果により浮上し、またピン止め効果によりある位置に支えられることになる。一方、軌道方向（紙面に垂直方向）では磁束は変化をしないので、無接触で超伝導体は移動することにな

る。通常は図 4 (c) の状態で実験することが多い。

ある程度の重量を有する超伝導体の安定な浮上や懸垂走行を実現するには、ピン止めされる磁束を増やすことが多いが、その方法を図 5 (a) に紹介しておく。これは磁場中冷却という方法である。常伝導の状態では、ピン止め中心を持つ第 II 種超伝導体を磁石軌道上である高さに固定して置き、そこで T_c 以下に冷却して超伝導状態にするというものである。こうすることで、かなりの量の磁束を超伝導体内部にピン止めすることが出来る。なお、図 5 (b) 中の黒丸はピン止め中心を表す。超伝導体と磁石表面の間隔をアルミ板のようなものを挟んで間隔を調節してやれば、ピン止めの条件を変化させることもできる。

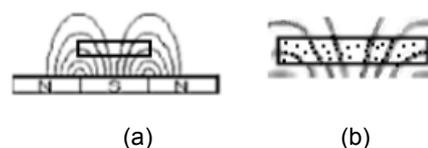


図 5 磁場中冷却による磁束のピン止め

2-3 磁気浮上用の磁石と超伝導体

ここでは、磁気浮上の実験に使用する永久磁石と超伝導体について述べる。図 3 に示したような磁石軌道には、ネオジウム鉄ホウ素磁石(以下、簡単に Nd 磁石)やフェライト磁石を使うことが多い。両者の形状及び表面磁束密度を表 1 に示す。磁石の磁束密度は独立した 1 個の場合と組磁石にした場合では異なる値になる。また組磁石の場合も下に敷く鋼板の厚みや種類によっても異なることがある。表 1 の場合は、孤立した 1 個の場合の磁束密度を表している。軌道にした場合、中央表面で Nd では 0.6 T、フェライトでは 0.3 T 程度である。

表 1 磁石の諸元

磁石の種類	ネオジウム磁石	フェライト磁石
長さ×幅×厚さ [mm]	20 × 10 × 3	20 × 10 × 4
表面磁束密度 [T]	0.2	0.1

次に、このような実験に使用する超伝導体であるが、普通は臨界温度が 90 K 級のイットリウム系酸化物超伝導体 ($YBa_2Cu_3O_{7-y}$) を使う。酸化物超伝導体は第 II 種超伝導体であり、ピン止め中心を分散させると、強い浮上力や懸垂力を発揮させることが出来る。本実験の場合は、本学の環境・生態学系 吉澤教授の指導の元で (株) 豊島製作所が特注製作した図 6 (a) のような円盤状 (直径 90 mm, 厚さ 15 mm) を使用している。

走行体はこれを 20 mm × 10 mm × 7 mm 程度の直方体にダイヤモンドカッターで切りだして、それらにガーゼを巻き付け、さらに外側を薄い発泡スチロールシートで覆ったもの(重量は 7~9 g)である (図 6 (b))。

図 3 のような磁石軌道上では、このような走行体は液体窒素に浸けて冷却後、静止状態で約 100 秒間、超伝導状態を保



図 6 超伝導体 (a) と走行体 (b)



図 7 磁気浮上 (a) と磁気懸垂 (b)

持できる。図 7 (a)と(b)は走行体が浮上と懸垂をしている様子を写真で示した。このような走行体を、磁場中冷却して、例えば Nd 磁石軌道上に置いた場合の拘束力の目安は、水平、鉛直方向ともに約 1~2 N 程度である。

2.4 展示模型の例

このような磁石軌道を用いた展示模型の例として、筆者らが現在使用しているものの写真を図 8 に示した。これは図 3 と同じ 3 列の Nd 磁石からなる軌道を曲げて敷設して、カーブや背面走行ができるような部分も作って鉄道模型(HO ゲージに近いスケール、約 1/80)のジオラマのように仕上げたものである。磁石軌道の総延長は約 6.7 m、高低差は最大で 0.272 m、カーブの曲率半径は最少で 0.235 m である。このようなジオラマを超伝導体で作った走行体が無接触で走る。その時の走行に対する抵抗力がどの程度かを調べるのが本研究の目的である。



図 8 展示模型の例

3. 実験方法の説明と結果

3.1 実験方法

走行時の抵抗力を測定するには、軌道の 2 点で速度を測定し、それらを比較すればよい。速度の測定にはビデオ画像解析やストップウォッチによる計測なども試みているが、こ

では市販の速度測定器(商品名ビースピ、(株)ナリカ製)を使った結果を示す。これは図 9 のようなコの字型の測定器であるが、内側に約 4 cm 離して配置してある赤外線センサー(右の図で白点でマーク)の間を走行体が通過する時間から速度を求めるといったものである。

表示レンジは 4 桁で、最大 99.99 km/s まで測れるが、センチメートルの単位で、例えば 123.4 cm/s のように表示するレンジもある。この装置の測定精度は、1~2 m/s 程度の速度で



図 9 速度測定器

は、1%以内と報告されている⁴⁾。またどちらかの赤外線センサーを走行体が通過する時間間隔も、0.00 s から 99.99 s までで表示することが出来る。

実際の測定は斜面直線軌道と平面周回軌道を使う方法で行った。まず斜面の方法について述べる。図 10 のように磁石軌道で斜面を作り、そこを初速 0 で、超伝導体で作った走行体を滑らせて最終速度を求めるといった方法をとった。



図 10 磁気レールの斜面

その際、以下のように条件を変えて測定を行った。

- (i) 斜面の長さを $l = 1.100$ (m)、高さは $h = 0.015, 0.030, 0.045, 0.060$ (m) の 4 種類に設定した、
- (ii) 超伝導体を磁石軌道上に磁場中冷却する際の高さを変えて、浮上走行させた、
- (iii) 使用する磁石 (Nd 磁石とフェライト磁石) を変えた。それぞれを Nd 磁石軌道、フェライト磁石軌道ということにする。

ここでは等加速度運動について簡単にまとめておく。初速 0 で距離 l だけ進んだ時の最終速度が v であった時、その等加速度運動の加速度 a は

$$a = \frac{v^2}{2l} \quad (1)$$

である。

斜面の運動にこの式を適用しよう。 l は一定であり、 v は測定されるので、 a が求まるが、この a は重力加速度 g の斜面に平行な成分 gh/l と斜面に固有の抵抗力 F の差で与えられるはずである。とりあえず、 F は終始一定であるとする、斜面を滑る質量 M の物体の運動方程式は

$$Ma = \frac{Mgh}{l} - F \quad (2)$$

である。(1) と (2) より抵抗力 F は

$$F = \frac{Mgh}{l} \left(1 - \frac{v^2}{2gh}\right) \quad (3)$$

となる。したがって、(3) に実測の v を入れることで抵抗力が求められる。

なお、これはエネルギー保存則を使っても同じ式を導くことが出来る。抵抗力(摩擦)のない斜面を物体が滑り落ちた最終速度を v_0 として、抵抗力のある時の最終速度を上記のように v とすると、両者の運動エネルギーの差は l の距離を抵抗力 F に抗して移動した仕事量 Fl に等しいので

$$\frac{Mv_0^2}{2} - \frac{Mv^2}{2} = Fl \quad (4)$$

となる。最初の項は位置のエネルギー Mgh に等しいので、この式は

$$Mgh - \frac{Mv^2}{2} = Mgh \left(1 - \frac{v^2}{2gh}\right) = Fl \quad (5)$$

となり、結局 (3) と同じ式になる。

(3) や (5) の括弧の中の後の項は、物体が滑り落ちて得た運動エネルギーと位置のエネルギーの比、すなわち、エネルギーの変換効率を表している。もし抵抗力がないならば、 $v_0^2 = 2gh$ あるので、この項は 1 となり、抵抗力は 0 になる。

以上のように磁気レールの斜面の傾斜を変えて、走行体の最終速度を測定することにより、走行体と磁気レールの間の抵抗力を推定することが出来る。

次に、平面で周回するような円軌道を走行させたときの実験も行った。これは図 11 のように円状に磁石軌道を敷設して、ある場所に測定器を 2 台並べ、1 周毎の速度と通過時間を記録する。走行体内の超伝導状態が安定に維持されている限り、周回走行は続く。したがって、速度と移動距離を同時に時間の関数として測定できるので、それを解析することで走行時の抵抗力を推測できる。円軌道の実験は Nd 磁石軌道のみで行い、半径 0.3 m 程度、軌道の長さ(磁石中央列)は 2.075 m である。



図 11 Nd 磁石の周回軌道

なお、走行の際の抵抗を測るのは直線軌道の 2 か所で速度を測ればよいはずであるが、この場合それができないのは、1 m 程度しか離れていない 2 点間の速度変化は小さすぎて、現在の測定器で測定限界にかかるからである。

3・2 斜面の実験結果

3・2・1 Nd 磁石軌道

表 2 は Nd 磁石軌道において、長さ $l = 1.100$ (m) の斜面の高低差 h (勾配) を 4 通り変えて行ったときの実験結果をまとめたものである。この場合、走行体は別途作った、同じ種類の短い磁気軌道の上に固定して置き、それを液体窒素の中に浸して磁場中冷却(図 6 参照)することで磁束をピン止めして、それを斜面の磁気軌道の上において滑らせた。なお、その時の走行体底部と磁石軌道表面の間の距離を浮上高さと呼び、それを d (mm) で表すことにする。最終速度は斜面を滑り落ち切ったときの速度であるが、これは 10 回測定しての平均値を示している。標準偏差も示したが、測定誤差は十分に 1% 内におさまっている。

表 2 Nd 磁石軌道での結果 (高低差 h を変えた場合)

浮上高さ d (mm)	3.6	3.6	3.6	3.6
高低差 h (m)	0.060	0.045	0.030	0.015
最終速度 v (m/s)	1.024	0.889	0.724	0.522
標準偏差	0.003	0.005	0.008	0.005
理想速度 v_0 (m/s)	1.084	0.939	0.767	0.542
エネルギー効率	0.892	0.895	0.891	0.926
抵抗力 (m/s^2)	0.058	0.042	0.029	0.010

測定は連続して数回を行い、途中で液体窒素に浸して再冷却することもあるが、総計 10 回行った。この間、平均値から大きく離れた値になることはなかったので、超伝導体の温度は、この間は一定になっているものと推定できる。

理想速度とは位置のエネルギーで決まる最終速度であり、 $g = 9.8$ (m/s^2) と高低差 h を使い、 $v^2 = 2gh$ より計算したものである。エネルギー効率は前節で述べた $v^2/2gh$ のことである。これが 1 であれば、抵抗力無しで斜面を滑り落ちたということである。抵抗力は (3) のことであり、 $M = 1$ として加速度の単位で示してある。

これからわかるように、観測された速度 v は当然ながら、理想値 v_0 より小さくなっている。理想値からのズレは高さ h が大きくなるほど、すなわち最終速度 v が早くなるほど大きくなる。それに応じてエネルギー効率も変化している。速度の測定誤差を最大 1% と見込んでも、このような変化は有意のものと考えることが出来る。

エネルギー損失を斜面の長さ $l = 1.100$ (m) で割ることにより算出したものを仮想的な抵抗力としてみた。この抵抗力の大きさを簡単に評価しておこう。 $h = 0.060$ (m) のときのそれは $0.0578 m/s^2$ となった。このときの斜面に沿った重力加速度は $9.8 \times 0.060 / 1.100 = 0.535$ (m/s^2) であるので、その 10% 程度の逆向きの力が存在していることになる。また、最も小さい $h =$

表 3 Nd 磁石軌道の結果(浮上高さを変えた場合)

浮上高さ d (mm)	3.55	4.59	5.89	6.20	7.00	7.85	8.22	8.85
最終速度 v (m/s)	1.024	1.034	1.034	1.037	1.043	1.044	1.050	1.046
標準偏差	0.003	0.004	0.005	0.001	0.003	0.002	0.003	0.003
理想速度 v_0 (m/s)	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084
エネルギー効率	0.892	0.910	0.910	0.914	0.925	0.927	0.937	0.930
抵抗力 (m/s^2)	0.058	0.048	0.048	0.046	0.040	0.039	0.034	0.037

0.015 (m)のときでも、抵抗力は 0.01 m/s^2 、斜面に沿った重力加速度は $9.8 \times 0.0015 / 1.100 = 0.134 \text{ (m/s}^2)$ であるので、重力とは逆向きに約 7%の力がはたらいていることになる。これらの力の大きさは決して無視できるような小さいものではないといえる。

ところで、高低差 h とそれに対応した実測された v を (3) に入れて計算される F は一定でなければ、(1) と (2) を前提とした等加速度運動の解析は厳密には成立しないことになる。しかし、すでに上記のように一定とはなっていない。

これは超伝導体が斜面を移動する時に、単純な等加速度運動をしているのではなく、速度に依存するような抵抗力が発生していると考えられることもできる。そこで、とりあえず表 2 の最終速度の半分が、各場合に起こっている運動の平均速度と考えて、抵抗力をその平均速度の関数としてグラフにしたのが図 12 である。

測定点は 4 つしかないが、速度の増加とともに抵抗力の増加がみられる。ただし、これはある一定の速度に対して求められたものではなく、初速 0 の状態から出発した加速度運動

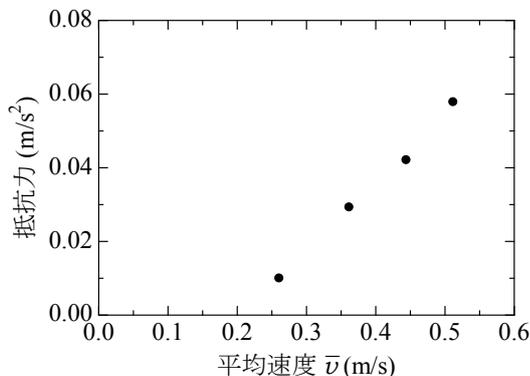


図 12 速度の関数としての抵抗力

から推定したものであることに注意されたい。正確には斜面ではなく、平面上でより広い速度範囲での測定が必要である。この点は次節で再び議論したい。

このような抵抗力の起因は超伝導体周辺の磁束の状態に関わっているものと思われるので、上記の 4 つの高さの斜面で、 $h = 0.060$ (m) に固定して、浮上の高さ d を変えることで、速度の変化を調べるといふ実験を行った。

表 3 に Nd 磁石軌道での結果を示す。なお、この中で $d = 3.55$ (mm) は表 2 の結果と同じものを再掲してある。走行体の浮上高さ d の調節は、磁場中冷却時の軌道上に固定する高さを

変えることで行った。その結果、 d を表 3 のように 8 通りに変化させることが出来た。各項目は表 2 と同じである。

浮上高さ d を増した場合、すなわち磁気軌道上で走行体が高い位置に浮上させた場合には、速度の上昇が見られた。その変化は斜面の高さを変えた場合に比べてかなり小さいが、現在の測定精度から判断して、有意の差であるといえる。この速度を使って表 2 の場合と同様に、抵抗力を計算した。 d の関数として、抵抗力の変化を図 13 に示した。

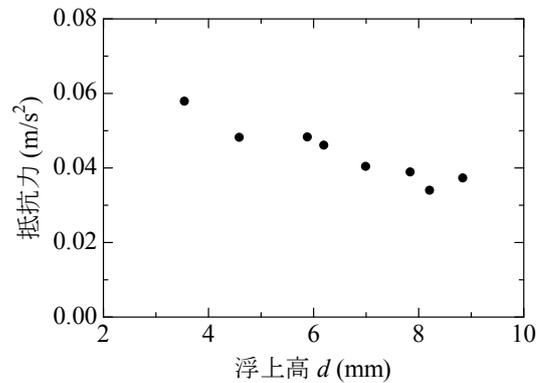


図 13 浮上位置による抵抗力の変化 (Nd 磁石軌道)

図 13 からわかるように、 d の増加とともにほぼ単調に抵抗力も減少していくが、ある程度距離が離れてくると飽和するようである。 d をさらに大きくするという事は、最終的にはピン止めはなくなり、図 4 (b) のようなマイスナー効果による浮上状態になることを意味している。そのような状態での実験も行ったが、揺れが大きく安定走行が難しくなり、再現性のある結果は得られなかった。

Nd 磁石軌道では高低差 $h = 0.060$ (m) において、懸垂状態で走行させたときの測定も行った。その結果を表 4 に示す。この場合の走行は浮上走行に比べると、揺れなどが大きくか

表 4 懸垂走行の結果

浮上高さ d (mm)	4.0
最終速度 v (m/s)	0.992
標準偏差	0.009
理想速度 v_0 (m/s)	1.084
エネルギー効率	0.837
抵抗力 (m/s^2)	0.087

表 5 フェライト磁石軌道の結果 (浮上高さを変えた場合)

浮上高さ d (mm)	1.8	2.4	3.5	3.8	4.3	5.1	5.2
最終速度 v (m/s)	0.934	1.022	1.029	1.045	1.057	1.042	1.048
標準偏差	0.037	0.003	0.002	0.001	0.009	0.000	0.002
理想速度 v_0 (m/s)	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084	1.084
エネルギー効率	0.741	0.888	0.900	0.929	0.950	0.923	0.934
抵抗力 (m/s^2)	0.138	0.0600	0.0532	0.0378	0.026	0.041	0.035

なり不安定であった。それを反映してエネルギー効率は低くなり抵抗力も大きい。また測定時のばらつきもやや大きめになっている。

3・2・2 フェライト磁石軌道

次はフェライト磁石軌道での実験である。この場合にも高低差 $h = 0.040$ (m) に固定して、7種類の浮上高さ d に対して実験を行った。結果は表 5 に示す。また、抵抗力を d の関数として描いたグラフを図 14 に示した。

フェライト磁石軌道での結果は、基本的には Nd 磁石軌道の場合と同じ傾向であるが、大きな違いは、磁場中冷却後、磁気軌道上に走行体を置くと、磁場が弱いために、自重で沈み、浮上高さ d が低くなることである。なお、実験に使用した走行体は Nd 軌道とフェライト軌道ともに共通である。

浮上位置 $d = 1.8$ (mm) の時に最大の抵抗力を示すが、これは超伝導体が磁石表面の複雑な磁場と関わるためと思われる。

3・3 Nd 磁石周回軌道の実験結果

本節では Nd 磁石周回軌道 (図 11) での測定結果について述べる。測定は測定器が置かれた点を最初に通過した時刻を $t = 0$ とし、その時の速度を初速として、それ以後の周回ごとに通過時間と通過速度を記録する。1 周は前記したように 2.075 m であるから、各通過時間までの走行距離はその整数倍となる。走行体の浮上位置は、前節と同じ $d = 3.6$ (mm)、重量はほぼ同じであるが、同一の超伝導走行体ではない。このような運動特性を 10 回程度、初速を変えて調べた。今のところ、2 回目の周回時の速度が初速より大きくなることがあるなど興味深い事実が分った。これはピン止めの状態が走行

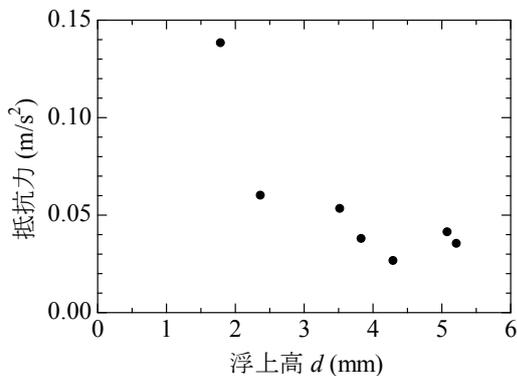


図 14 浮上位置による抵抗力の変化 (フェライト磁石軌道)

表 6 初速 2 m/s 以上の周回軌道の運動特性

時間 (s)	速度 (m/s)	距離 (m)
0.00	2.067	0.000
1.05	1.899	2.075
2.18	1.801	4.150
3.40	1.685	6.225
4.73	1.513	8.300
6.18	1.383	10.375
7.80	1.179	12.450
10.18	0.659	14.525
13.68	0.481	16.600
19.20	0.231	18.675

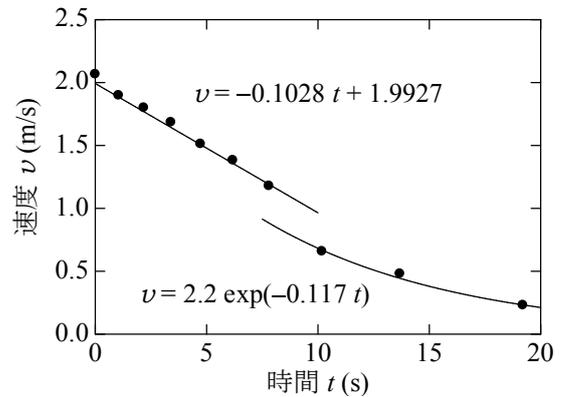


図 15 速度の時間特性の例 (初速 2 m/s 以上)

時に変化したためではないかと推測しているが、全体としてはある程度共通の傾向を見出している。

まず、初速が 2 m/s 以上の場合の測定結果を表 6 に示す。図 15 は表 6 の速度を時間の関数として示したものである。この図よりわかることは、速度の時間特性は概ね 1 m/s 以上の領域では、時間 t の 1 次関数で、それ以下では指数関数で記述できるということである。

表 7 初速 1 m/s 以下の周回軌道の運動特性

時間 (s)	速度 (m/s)	距離 (m)
0	0.872	0.000
3.03	0.578	2.075
6.96	0.431	4.150
13.01	0.233	6.225

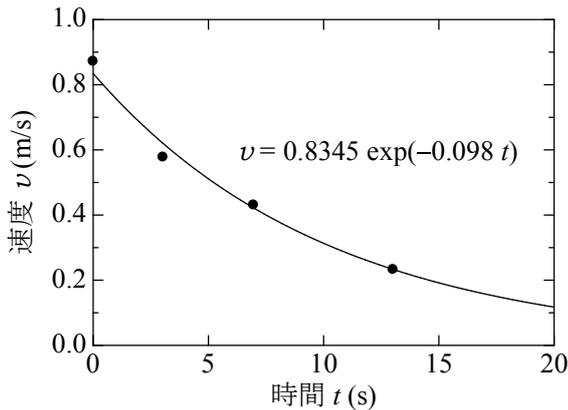


図 16 速度の時間特性の例(初速 1 m/s 以下)

次に、もっと遅い初速を与えた場合の測定例を表 7 に示し、その速度を時間の関数として図 16 に示した。この場合には、速度は明らかに指数関数だけで表現できることがわかる。

以上のことから、このような磁気軌道での超伝導体の走行特性について、以下のようにまとめられる。

$v > \sim 1$ (m/s) の時、

速度は初速を v_1 として $v = -0.1t + v_1$ のような等加速度運動と表現できる。すなわち、進行方向に 0.1 m/s^2 程度の負の加速度をもって減速する。これは、この程度の抵抗力をもってると解釈できる。

$v < \sim 1$ (m/s) の時、

速度 v が指数関数的に表現できるということは、運動方程式は質量を M として $Mdv/dt = -kv$ である。すなわち、速度に比例した逆向きの力を受ける運動である。この解は $\exp(-kt/M)$ の形である。図 15 と図 16 の指数関数の近似式より k/M は $0.098 \sim 0.117$ 程度と推測できる。したがって、加速度は $dv/dt = (-k/M) \times v$ であることに留意すれば、進行方向に逆向きの加速度は、 $(0.098 \sim 0.117) \times v \approx 0.1 v$ となる。図 12 の抵抗力と速度 v の関係は、これに矛盾しないものである。

4. まとめ

4.1 実験結果のまとめと考察

我々の使用している図 8 のような超伝導磁気浮上走行の展示モデルのスケールでの Nd 磁石軌道では $1 \sim 2 \text{ m/s}$ で走行させることが普通であるが、その時の抵抗力は 0.1 m/s^2 程度、すなわち重力加速度 g の 1% 程度の抵抗力が発生することになる。なお、このような値は、図 3 のような磁気軌道に限って得られるものであり、特に一般性のある値ではないということに注意していただきたい。

図 8 のような模型では、軌道上の最高点から走らせると、1 周で約 15% 程度のエネルギーを損失することになる。実際に走らせてみると、出発点の高さに対してその程度のレベルまで戻ってくるので、実際の印象とよくあっている。

抵抗力の速度依存性は興味深い結果であるが、これは超伝導性による内因的な効果というよりも、第一義的には、軌道が小磁石を繋いで構成されていることにありと現在のところ

考えている。小磁石の継目には磁束の乱れがあり、超伝導体が継目を通る時には姿勢が崩れ、そこから周期的にパルス状の抵抗力が発生しているとすれば説明が可能である。継目から発生するパルスの数は速度に比例するために、初期の段階では速度に比例した抵抗力となる。ただ、ある程度早くなると、周期性は認識できなくなりほぼ一定の抵抗力になるというわけである。

したがって、速度が非常に遅くなった時には、不連続な運動になるので注意が必要である。例えば図 12 の抵抗力が立ち上がる直前の部分、すなわち斜面の傾きを非常に小さくしていった時の運動の解析は難しい問題を含んでいる。

また抵抗力は浮上高さが高いほど減少するが、これは超伝導体を貫く磁束やそれが遮蔽する磁束に関係していると思われる。浮上高さが高いと、磁束が減少するため、そこから発生している軌道上の磁場の乱れも減少すると思われる。

そのような磁束と超伝導体との問題を、遮蔽電流やローレンツの力などの内因的な要因から解釈することは物理学としては魅力的であるが、そのような方向に展開できるかどうか、今のところはわからない。

現在までの周回軌道の実験結果の中には、走行中にピン止めの状態が変化していると思われるものもあり、このようなスケールの実験で、物理学の問題として議論できるようなデータを提供できるかどうかはまだ何とも言いえない段階であるということである。

4.2 終わりに

筆者らは超伝導磁気浮上懸垂走行の問題を長年取り扱ってきたが、それは学術的なことのみならず、科学教育広報活動の題材として、あるいは研究の合間の遊びとしても楽しんできた¹⁾。ここで報告したような定量的な実験は、最近始めたことであり、もっと洗練された実験法や解釈などがあれば、ぜひアドバイスをいただきたいと思っている。

終わりに、この研究活動は高重研究室の卒業研究の一環としても行っているものであり、本年度(2015)卒研生である見澤涼太君をはじめ青木浩晃君、青砥大昂君、兼原眞君、宮代圭太君、2014 年度卒業の伊東賢吾君、2013 年度の田中千穂理さん、西智弘君、2012 年度の熊坂秀人君、村井萌さん、佐野錠太郎君、中村哲也君達の大きな協力があったことを、この機会に明記して感謝したい。

参考文献

- 1) 高重正明, 鈴木晴彦, 田沼静一: 固体物理 **26** (1991)461-465 等
- 2) H. Suzuki, K. Yogiashi, K. Kusano and M. Takashige: Electrical Engineering in Japan **116** (1996) 18-27
- 3) 例えば, 高重正明, 田沼静一: 実験物理学シリーズ 3 高温超伝導体とエキゾチック超伝導体 (共立出版, 1999) pp.281-290.
- 4) 寺島 幸生, ONGWAE George Mogamb SUPARAT Suthampang, 本田 亮: 応用物理教育 **32**(2), 45-50, 2008-12-15 等.